VISIT…

LANZAROTE Caliente.COM

INTRODUCTION TO PHYSICS OF OPEN SYSTEMS

Yu. L. KLIMONTOVICH

Main concepts of a new interdisciplinary branch of science, "Physics of open systems", are discussed. Ideas, methods, and results of physics of open systems serve as a basis for pedagogical and scientific activity of specialists in various branches of science: physicists and mathematicians, chemists and biologists, economists and sociologists.

Рассматриваются основные понятия нового междисциплинарного научного направления "Физика открытых систем". Идеи, методы и результаты физики открытых систем служат фундаментом педагогической и научной деятельности специалистов разного профиля – физиков и математиков, химиков и биологов, экономистов и социологов.

© Климонтович Ю.Л., 1996

ВВЕДЕНИЕ В ФИЗИКУ ОТКРЫТЫХ СИСТЕМ

Ю. Л. КЛИМОНТОВИЧ

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

I. НЕМНОГО ИСТОРИИ

При рассмотрении основных идей и понятий нового научного направления естественно начать с краткого изложения истории вопроса.

Возникновение физики открытых систем было подготовлено трудами многих выдающихся исследователей девятнадцатого столетия. В их числе физик Людвиг Больцман, математики Анри Пуанкаре и Александр Ляпунов и, конечно, биолог Чарльз Дарвин.

Людвиг Больцман назвал XIX столетие веком Дарвина. Он полагал тем самым, что теория эволюции Дарвина, основанная на принципе естественного отбора, является наиболее значительным открытием прошлого века. Такой вывод может показаться неожиданным. Действительно, XIX век очень богат великими открытиями в естествознании, в частности в физике. Ведь XIX век – это век термодинамики, созданной в значительной мере трудами Сади Карно, Рудольфа Клаузиуса и Вильяма Томсона. Это век электромагнитной теории Майкла Фарадея и Джеймса Максвелла.

В XIX веке были заложены и основы современной молекулярно-кинетической теории материи. Одним из ее основателей был сам Людвиг Больцман. Именно он предложил первое кинетическое уравнение для описания необратимых процессов в газах. Оно описывает, в частности, установление равновесного состояния в газе. Больцман ввел впервые и статистическое определение энтропии. Он доказал и знаменитую H-теорему, согласно которой в процессе установления равновесного состояния энтропия монотонно возрастает и остается постоянной при его достижении. Наконец именно Больцман понял, что в замкнутых системах энтропия может служить мерой относительной степени хаотичности. И все же именно Больцман определил XIX век как век Дарвина. Тем самым на первое место он поставил принцип биологической эволюции.

В чем же дело? Ведь во времена Больцмана не существовало каких-либо математических моделей биологической эволюции. Основным движущим фактором была уверенность Больцмана в том, что развитая им теория временно́й эволюции газа в замкнутой системе будет обобщена и на открытые системы. К числу последних относятся и все биологические объекты. Теория эволюции Дарвина и была, таким образом, первым шагом в теории эволюции

открытых систем. Больцман был одним из немногих в то время, кто понял важность этого "первого шага".

Такую точку зрения в то время разделяли не многие. Да и сама теория Больцмана вызвала возражения у большинства ученых того времени. Вокруг теории Больцмана бушевали страсти. Среди его оппонентов был и величайший математик того времени Анри Пуанкаре. Он полностью отвергал теорию Больцмана.

Для иллюстрации приведем небольшой отрывок из книги И. Пригожина [1] "От существующего к возникающему": "Пуанкаре в одной из своих работ открыто не рекомендовал изучать труды Больцмана на том основании, что посылки в рассуждениях Больцмана противоречат его, Пуанкаре, выводам!" Пуанкаре, основываясь на обратимых уравнениях механики, пришел к выводу, что теория необратимых процессов и механика несовместимы. Основанием служило, в частности, то, что в механике нет функции, играющей роль энтропии.

Известно и другое высказывание Пуанкаре, приведенное в одной из статей И. Пригожина: "В этой связи забавно вспомнить слова Пуанкаре о том, что рекомендовать кому-либо прочитать работу Больцмана он не может, так как не может рекомендовать изучение доказательств, в которых выводы противоречат предпосылкам."

Как разительно отличается от оценки Пуанкаре оценка работ Людвига Больцмана, данная представителем следующего поколения ученых, одним из основателей квантовой механики – Эрвином Шредингером. На стр. 161 той же книги [1] Пригожина читаем: "Его (Больцмана) направление мышления можно было бы назвать моей первой любовью. Никакие идеи не захватывали меня столь глубоко и вряд ли смогут захватить меня в будущем."

Таким образом, уже на пороге XX столетия стало ясно, что развитие теории неравновесных процессов в физических и биологических системах является одной из важнейших задач естествознания. Оказалось, однако, что от понимания важности проблемы до ее даже далеко не полного решения потребовалось почти целое столетие.

Первым принципиальным шагом в этом направлении была развитая Альбертом Эйнштейном, Марианом Смолуховским и Полем Ланжевеном теория броуновского движения – хаотического движения малых, но все же макроскопических частиц в жидкости. Его причиной являются толчки со стороны молекул жидкости. Таким образом, система броуновских частиц представляет пример открытой системы.

Теория броуновского движения была развита в начале текущего столетия и сразу стала рабочим инструментом при рассмотрении многих физических явлений. Однако лишь по прошествии более полувека в статистической теории открытых систем были сделаны последующие принципиальные шаги. Для этого понадобились новые идеи, новые образы и понятия: *самоорганизация*, *синергетика*, *физика открытых систем*. Об этом и пойдет речь ниже. Здесь же отметим следующее.

Большую роль в теории открытых систем играют работы А.М. Ляпунова – одного из создателей теории устойчивости движения, математика А.Н. Колмогорова, физиков Л.И. Мандельштама, А.А. Андронова, Н.С. Крылова, Я.Б. Зельдовича и многих других. К числу основоположников теории самоорганизации относится несомненно Владимир Иванович Вернадский – создатель учения о ноосфере (сфере разума).

Приступим теперь к изложению основного материала. По мере продвижения вперед мы снова будем делать краткие экскурсы в историю.

II. ФИЗИКА ОТКРЫТЫХ СИСТЕМ. ДИССИПАТИВНЫЕ СТРУКТУРЫ. СИНЕРГЕТИКА

Из названия следует, что речь пойдет об открытых системах, которые могут обмениваться с окружающими телами энергией, веществом и, что не менее важно, информацией.

Здесь будут рассматриваться макроскопические открытые системы. Они состоят из многих объектов, принимаемых за элементы структуры. Эти элементы могут быть микроскопическими, например, атомы или молекулы в физических и химических системах. Они, однако, могут быть малыми, но все же макроскопическими. Это, например, макромолекулы в полимерах, клетки в биологических структурах. Они могут быть и не малыми телами, например "элементарные" объекты в социологии.

Именно благодаря сложности открытых систем в них возможно образование различного рода структур. При этом вся диссипация играет при образовании структур конструктивную роль. Это кажется, на первый взгляд, удивительным, так как понятие диссипации ассоциируется с затуханием различного рода движений, с рассеянием энергии, с потерей информации. Однако, и это чрезвычайно существенно, диссипация необходима для образования структур в открытых системах.

Чтобы подчеркнуть это обстоятельство, Илья Пригожин ввел термин "диссипативные структуры". Это чрезвычайно емкое и точное название объединяет все виды структур: временны́е, например автоколебания в генераторе, пространственные, например ячейки Бенара на поверхности жидкости, и, наконец, наиболее общие пространственно-временны́е структуры. Примером последних могут служить автоволны на поверхности жидкости.

Сложность открытых систем предоставляет широкие возможности для существования в них коллективных явлений. Чтобы подчеркнуть роль коллектива, роль кооперации при образовании

диссипативных структур, Герман Хакен ввел термин *синергетика*, что означает совместное действие.

Синергетика – не самостоятельная научная дисциплина, но новое междисциплинарное научное направление; цель синергетики – выявление общих идей, общих методов и общих закономерностей в самых разных областях естествознания, а также социологии и даже лингвистики; более того, в рамках синергетики происходит кооперирование различных специальных дисциплин.

Синергетика родилась на базе термодинамики и статистической физики. Слово "физика" в названии этой статьи подчеркивает, что в основе теории открытых систем лежат фундаментальные физические законы.

III. ДЕГРАДАЦИЯ И САМООРГАНИЗАЦИЯ В ПРОЦЕССАХ ЭВОЛЮЦИИ

Эволюция – это процесс изменения, развития в природе и обществе. Такое понятие является очень общим. В физических замкнутых системах эволюция во времени приводит к равновесному состоянию. Ему отвечает, как показал впервые Больцман на примере разреженного газа, максимальная степень хаотичности. В открытых же системах можно выделить два класса эволюционных процессов.

• Временна́я эволюция к равновесному (неравновесному, но стационарному) состоянию.

• Процесс эволюции идет через последовательность неравновесных стационарных состояний открытой системы. Смена стационарных состояний происходит благодаря медленному изменению так называемых управляющих параметров.

Теория эволюции Дарвина основана на принципе естественного отбора. При этом эволюция может вести либо к деградации, либо представлять собой процесс самоорганизации, в ходе которого возникают более сложные и более совершенные структуры. Самоорганизация является, таким образом, не единственным результатом эволюции. Ни в физических, ни даже в биологических системах не заложено "внутреннее стремление" к самоорганизации. Физическим примером деградации может служить временная эволюция к равновесному состоянию замкнутой системы.

Таким образом, самоорганизация – лишь один из возможных путей эволюции. Для ответа на вопрос, по какому пути будет развиваться процесс, надо иметь критерии самоорганизации. При этом нет необходимости давать определения таких фундаментальных понятий, как деградация и самоорганизация. Такие определения очень трудны и, что существенно, не однозначны. Более важным является сравнительный анализ относительной степени упорядоченности (или хаотичности) различных состояний рассматриваемой открытой системы. Только такой анализ может дать ответ на вопрос: является ли рассматриваемый в открытой системе процесс эволюции самоорганизацией или деградацией?

Мы уже использовали понятия *хаос* и *порядок*. Как же отличить порядок от хаоса? В ряде случаев такое отличие представляется очевидным. Однако сравнение, например, ламинарных и турбулентных течений показывает, что кажущийся очевидным вывод может оказаться все же неправильным. Для получения более обоснованных ответов и нужны, как уже говорилось, количественные критерии относительной степени упорядочности (или хаотичности) различных состояний открытых систем.

Результаты такого анализа объективны и дают дополнительную информацию. Основная информация состоит в установлении некоторой "нормы хаотичности", а также в установлении отклонений от нормы (в ту или иную сторону) под влиянием тех или иных воздействий. В биологии это могут быть различные стрессы, которые и вызывают отклонения степени хаотичности от нормы. При этом отклонения в ту и другую стороны могут означать "болезнь" и, следовательно, представлять собой процесс деградации.

Таким образом, далеко не всегда констатация (по выбранному критерию) уменьшения степени хаотичности означает наличие самоорганизации и, наоборот, констатация увеличения степени хаотичности означает наличие деградации. Такие выводы правомерны только в тех открытых физических системах, когда за начало отсчета степени хаотичности можно принять состояние теплового равновесия. В такой открытой системе, как, например, генератор электрических колебаний, равновесному состоянию, то есть состоянию при нулевой обратной связи, отвечают тепловые колебания в электрическом контуре.

Поскольку нормальное функционирование организма возможно лишь при некоторой норме хаотичности, которая отвечает существенно неравновесному состоянию, то указанной выше точки отсчета здесь не существует. По этой причине в биологии, а также, конечно, в экономике и социологии объективная информация об изменении степени хаотичности еще недостаточна, чтобы делать вывод о наличии процесса самоорганизации или деградации.

Здесь целесообразна другая классификация. Если удается установить для данной системы норму хаотичности, то отклонения в обе стороны можно рассматривать как "болезнь" и, следовательно, как деградацию. Далее можно контролировать выбор методики "лечения". Здесь снова вступает в игру критерий относительной степени упорядоченности. Если по этому критерию "лечение" приближает состояние открытой системы к норме, то имеет место процесс самоорганизации. В противном случае "лечение" вызывает дальнейшую деградацию.

Но каковы же критерии относительной степени упорядоченности? Что является относительной мерой порядка или беспорядка? Это очень сложные вопросы, и ответы на них были получены совсем недавно.

Трудности введения относительной меры упорядоченности (или, напротив, хаотичности) открытых систем связаны в первую очередь с отсутствием четких определений самих исходных понятий: хаос, порядок, деградация, самоорганизация. Определения этих понятий, как уже отмечалось, являются в большой мере условными. Мы только что отметили, что далеко не всегда, особенно в биологии, а также социологии и экономике, переход к более хаотическому состоянию следует рассматривать как деградацию. Существенным является рассмотрение отклонений от нормы хаотичности.

В связи с изложенным полезно рассмотреть основные понятия более подробно. Это и откроет нам путь для формулировки критерия относительной степени упорядоченности, без которого сами понятия деградации и самоорганизации остаются фактически бессодержательными.

IV. ФИЗИЧЕСКИЙ И ДИНАМИЧЕСКИЙ ХАОС. НЕРАВНОВЕСНЫЕ ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ

Хаос и порядок – понятия, которые играли существенную роль уже в мировоззрении философов древности. Не вдаваясь в детали, отметим лишь сформулированные ими положения, которые сохраняют свое значение и по сей день.

По представлениям Платона и его учеников, хаос – состояние материи, которое остается по мере устранения возможностей проявления ее свойств. С другой стороны, из хаоса возникает все, что составляет содержание мироздания, то есть из хаоса может рождаться порядок.

В физике понятия “хаос” и “хаотическое движение” являются фундаментальными, но все же недостаточно четко определенными. Действительно, согласно Больцману, наиболее хаотическим является движение в состоянии равновесия. Хаотическими, однако, называют и движения, далекие от равновесного. Это, например, “движения” в генераторах шума, предназначенных для подавления сигналов.

Хаотическими называют, как правило, и различного рода турбулентные движения в газах и жидкостях. Примером служит турбулентное движение в трубах. Оно возникает из ламинарного движения при достаточно большом перепаде давления на концах трубы. При этом представление о турбулентном движении как более хаотичном, чем ламинарное, кажется само собой разумеющимся. Такой вывод основан, однако, на смешении понятий сложности и хаотичности. При наблюдении турбулентного движения проявляется именно сложность движения. Вопрос же о степени хаотичности требует дополнительного анализа, и для количественных оценок необходимы соответствующие критерии.

В последние годы стало широко использоваться понятие “динамический хаос” для характеристики сложных движений в сравнительно простых динамических системах. Слово “динамический” означает, что отсутствуют источники флуктуаций – источники беспорядка.

По этой причине понятие “динамическая система” отвечает определенной идеализации. Более реальное хаотическое движение с учетом и случайных источников можно назвать “физический хаос”. Его примером и является хаотическое движение атомов и молекул в состоянии равновесия.

Первый пример динамического хаоса был обнаружен в работе Эдварда Лоренца в 1963 году. Он исследовал решение уравнений, которые служат математической моделью конвективного движения в газах и жидкостях. Конвективное движение возникает благодаря совместному действию поля тяжести и градиента температуры, создаваемого внешним источником тепла. Речь идет, таким образом, об открытой системе.

Представим себе слой жидкости, который подогревается снизу. Конвективное движение выражается в том, что более нагретые элементы жидкости перемещаются вверх, а более холодные – вниз. Происходит тем самым передача тепла снизу вверх. При достаточно малых градиентах температуры перенос тепла определяется за счет теплопроводности. Это молекулярный – неорганизованный – процесс. Он не сопровождается упорядоченным гидродинамическим движением, которое могло бы, подобно регулировке уличного движения, управлять переносом тепла.

Ситуация существенно меняется, когда градиент температуры превышает некоторое критическое значение. Изменение проявляется в том, что в жидкости возникает упорядоченное макроскопическое движение. Оно и называется конвективным. В результате происходит саморегулировка теплового потока: внутри ячеек более теплая жидкость поднимается вверх, а по краям более холодная опускается вниз. Таким образом, распределение встречных тепловых потоков становится с упорядоченным.

Эта ситуация напоминает регулировку встречных потоков при уличном движении. Есть, однако, и существенная разница. Действительно, регулировка уличного движения регламентируется правилами уличного движения. При конвективном же движении имеет место процесс самоорганизации. Задается лишь градиент температуры. Перестройка же движения происходит благодаря внутренним свойствам самой системы. Внешне результат этой перестройки проявляется в том, что на поверхности жидкости появляется диссипативная пространственная структура – ячейки Бенара. Благодаря такой перестройке обеспечивается бóльшая пропускная

способность, чем при молекулярном — неупорядоченном — теплопереносе. Появление новой структуры можно рассматривать как неравновесный фазовый переход.

Другим примером неравновесного фазового перехода может служить возникновение когерентного электромагнитного излучения в квантовых оптических генераторах — лазерах.

Отметим условия, необходимые для возникновения неравновесных фазовых переходов, которые выражаются в образовании новых диссипативных структур.

• Диссипативные структуры могут образовываться только в открытых системах. Только в них возможен приток энергии, компенсирующий потери за счет диссипации и обеспечивающий существование более упорядоченных состояний.

• Диссипативные структуры возникают в макроскопических системах, то есть в системах, состоящих из большого числа элементов (атомов, молекул, макромолекул, клеток и т.д.). Благодаря этому возможны коллективные — синергетические взаимодействия, необходимые для перестройки системы.

• Диссипативные структуры возникают лишь в системах, описываемых нелинейными уравнениями для макроскопических функций. Примерами могут служить кинетические уравнения, например уравнение Больцмана, уравнения газовой динамики и гидродинамики, уравнения Максвелла в электродинамике для напряженностей электромагнитного поля и т.д.

• Для возникновения диссипативных структур нелинейные уравнения должны при определенных значениях управляющих параметров допускать изменение симметрии решения. Такое изменение выражается, например, в переходе от молекулярного теплопереноса к конвективному теплопереносу по ячейкам Бенара.

Неравновесные фазовые переходы гораздо разнообразней, чем равновесные. Они играют существенную роль не только в физических, но и в химических и биологических процессах. Все больше осознается роль неравновесных фазовых переходов и в социальных системах, и в экономике.

Рассмотрим математическую модель, которая была использована в работе Лоренца для описания конвективного движения в атмосфере с целью предсказания погоды.

Конвективное движение в атмосфере описывается весьма сложными уравнениями газовой динамики. Они служат примером уравнений механики сплошной среды. Для математического моделирования этого движения Лоренц использовал весьма упрощенную модель — систему трех обыкновенных, но нелинейных дифференциальных уравнений. Они представляют собой динамические уравнения для макроскопических характеристик среды — компонент Фурье локальной скорости и температуры. Их решение может быть проведено лишь численно, с помощью компьютеров.

Проведенный анализ показал, что при достаточно больших значениях градиента температуры поведение решения является настолько сложным, что соответствующие движения воспринимаются как хаотические. Это и дало основание ввести новое понятие “динамический хаос”.

Более того, было установлено, что малейшее изменение начальных условий радикально меняет характер движения. Тем самым движение оказывается динамически неустойчивым. Поскольку начальные условия могут быть заданы лишь с конечной точностью, то предсказание вида движения по заданным начальным условиям становится практически невозможным.

Таким образом, из-за наличия динамической неустойчивости движения в атмосфере задача долгосрочного прогноза погоды становится чрезвычайно трудной.

V. УПРАВЛЯЮЩИЕ ПАРАМЕТРЫ

Итак, термином “хаос” характеризуют самые различные виды сложных движений. Во многих случаях, как мы видели, хаотическое движение очень трудно отличить от упорядоченного, но очень сложного движения. По этой причине возникает необходимость в критериях относительной степени упорядоченности или хаотичности различных движений в открытых системах. При этом оказывается очень важным выбор управляющих параметров, при изменении которых и происходят неравновесные фазовые переходы.

Выбор управляющих параметров представляет во многих случаях самостоятельную задачу. При этом возможны, естественно, ошибки. В связи с этим критерии степени упорядоченности должны содержать и возможность контроля правильности сделанного выбора управляющих параметров.

Приведем примеры. В лазерах управление может осуществляться путем изменения уровня накачки, то есть вклада энергии, за счет которой создается инверсная заселенность. В классических генераторах накачке соответствует так называемый параметр обратной связи.

При конвективном движении управляющим параметром служит градиент температуры. При переходе от ламинарного течения к турбулентному управление может осуществляться изменением разности давления на концах трубы.

В медицине роль управляющих параметров могут выполнять лекарства. Наблюдение за состоянием больного позволяет контролировать правильность выбора лекарства. Роль управляющего параметра играет и скальпель хирурга. Управляющим параметром может служить и время выздоровления — время,

в течение которого организм без внешнего вмешательства возвращается к норме.

VI. ДИНАМИЧЕСКОЕ И СТАТИСТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СЛОЖНЫХ ДВИЖЕНИЙ

Во введении мы отметили, сколь драматичным было соперничество двух теорий статистического и динамического описания неравновесных процессов. Хотя в настоящее время "накал страстей" не столь велик, эти два направления и по сей день развиваются в значительной мере независимо. Необходимость их синтеза особенно остро ощущается в последние годы, в первую очередь в связи с развитием физики открытых систем.

В чем же причина столь долгого противостояния этих двух фундаментальных научных направлений? Является ли такое независимое развитие оправданным?

Ответ на второй вопрос очевиден: их синтез необходим. Первый же вопрос не столь простой. Ниже мы попытаемся дать на него ответ.

Выделим два класса систем: динамические и стохастические (или статистические). Такое разделение является условным, так как во многих случаях трудно провести различие между динамическим и физическим хаосом. Его, однако, можно провести на основе численного эксперимента. Это оправдано, поскольку практически все представляющие интерес математические модели не имеют аналитических решений.

В основу классификации положим свойство воспроизводимости движения по заданным начальным условиям. Тогда, по определению, к динамическим относятся воспроизводимые, а к стохастическим – не воспроизводимые по начальным данным движения в нелинейных диссипативных системах.

Естественно, что в реальном эксперименте, когда наличие шума неизбежно, все процессы в той или иной мере являются стохастическими. При численном же эксперименте возможно точное (при заданной разрядности компьютера) повторение начальных условий. Воспроизводимость решения зависит лишь от структуры математической модели. Если уравнения не содержат случайных источников, то процесс воспроизводим и, следовательно, движение является динамическим, хотя оно и может быть при этом очень сложным и практически непредсказуемым. В противном случае (при наличии тех или иных источников), когда движение не воспроизводимо по начальным данным, мы имеем дело, следовательно, со стохастическим движением.

При исследовании стохастических процессов путем численного эксперимента существенно, что источники случайных чисел в компьютерах построены по определенному алгоритму и являются поэтому фактически детерминированными. Они могут рассматриваться как случайные, если характерные времена повторения для них значительно больше характерных времен релаксации динамической системы.

Основной особенностью динамического хаоса служит динамическая неустойчивость движения. Она выражается в сильной (экспоненциальной) расходимости близких в начальный момент траекторий. Следствием ее является перемешивание траекторий, наличие которого и позволяет перейти от полного описания на основе уравнений движения всех частиц к более простым уравнениям для функций, сглаженных по объему перемешивания. Тем самым радикально меняется способ описания. Система частиц заменяется сплошной средой.

Именно так, не делая на этом акцента, поступил Больцман, когда ввел свое знаменитое кинетическое уравнение для плотности распределения частиц в пространстве шести измерений – в пространстве координат и компонент скорости. Таким образом, функция распределения, для которой Больцман записал свое уравнение, является макроскопической характеристикой.

В результате такого радикального изменения меняется и временная симметрия уравнений. Именно система обратимых уравнений механики для системы частиц заменяется необратимым уравнением для макроскопической плотности сплошной среды – кинетическим уравнением Больцмана. Как следствие этого возникают новые характеристики, которых нет в механике частиц. Важнейшей из них является энтропия.

После классических работ А. Пуанкаре можно выделить два этапа развития динамической теории диссипативных систем. Первый связан с возникновением радиотехники, с необходимостью развития для этих целей теории автоколебаний. Замечательные физические и математические результаты в этой области принадлежат Ван дер Полю, Л.И. Мандельштаму, А.А. Андронову, А.А. Витту, Л.С. Понтрягину, Н.М. Крылову, Н.Н. Боголюбову и многим другим. Особое место в установлении связи динамического и статистического описания сложных движений принадлежит очень рано ушедшему из жизни Николаю Сергеевичу Крылову.

Второй этап развития динамической теории стимулировался проблемами теории турбулентности и трудностями решения задачи о долгосрочном прогнозе погоды. Фактическим его началом явилась работа Эдварда Лоренца. Значение этой работы было понято, однако, значительно позднее, после появления статьи математиков Д. Рюэля и Ф. Такенса, опубликованной в 1971 году. В ней был введен новый математический образ сложного движения в нелинейных диссипативных динамических системах – странный аттрактор.

Слово "странный" подчеркивает два свойства аттрактора. Это, во-первых, необычность его геометрической структуры. Она не может быть представлена в виде кривых или плоскостей, то есть геомет-

рических элементов целой размерности. Размерность странного аттрактора является дробной или, как принято говорить, фрактальной.

Во-вторых, странный аттрактор — это притягивающая область для траекторий из окрестных областей. При этом все траектории внутри странного аттрактора динамически неустойчивы.

Странный аттрактор существует только в нелинейных диссипативных системах с числом переменных больше двух. Так, уравнения Лоренца представляют систему трех нелинейных диссипативных уравнений. Напомним, что автоколебания, например в генераторе Ван дер Поля, описываются системой двух уравнений. В этом случае имеются лишь простые аттракторы: состояние покоя (точка) и предельный цикл (замкнутая кривая). Для возможности существования странного аттрактора необходимо усложнение генератора Ван дер Поля. Оно может быть осуществлено различными способами.

Один из них принадлежит В.С. Анищенко и В.В. Астахову. Они ввели дополнительную обратную связь с использованием полупериодного детектора. Такой генератор описывается системой трех дифференциальных уравнений, которые содержат два управляющих параметра: параметр обратной связи и характерный временной параметр, определяющий степень запаздывания.

Результаты физического и численного экспериментов показали следующее. При фиксированном времени запаздывания по мере увеличения параметра обратной связи в генераторе возникает последовательность бифуркаций удвоения периода колебаний — бифуркаций Фейгенбаума. Так происходит до некоторого критического значения параметра обратной связи. При значениях больше критического возникает странный аттрактор со сложным чередованием областей динамического хаоса и порядка. При этом в широкой области значений параметров наблюдалась достаточная близость результатов физического и численного анализа. Это соответствие нарушается, однако, вблизи критических точек — точек бифуркации, где динамическая математическая модель генератора оказывается недостаточной.

Подведем некоторые итоги. Мы видели, что в сравнительно простых динамических системах существуют чрезвычайно сложные движения, которые воспринимаются как хаотические. Это и дало основание для введения новых понятий: странный аттрактор и динамический (или детерминированный) хаос.

Слово “хаос” является, как правило, негативным как в физике и биологии, так, например, и в экономике. Это понятие, однако, как уже отмечалось выше, очень многогранно. Так, жизнь невозможна как при полном хаосе, так и при полном порядке. Для нормального организма нужна некоторая норма степени хаотичности. Для ее определения и поддержания необходимы количественные оценки относительной степени хаотичности.

Покажем, что динамическая неустойчивость может играть в физике открытых систем и конструктивную роль. Начнем с иллюстративного примера из социологии. Представим себе, что происходит лекция для учителей, которые съехались из различных областей России. Предположим, что лекция подошла к концу, исчерпаны все вопросы. Примем это состояние слушателей за начальное. Рассмотрим два возможных варианта их дальнейшего движения. 1. Слушатели после окончания лекции перемещаются вместе, не удаляясь друг от друга на значительные расстояния. 2. Слушатели разъезжаются по местам работы и жительства — “разбегаются экспоненциально”. Иными словами, движение слушателей становится “динамически неустойчивым”. Какой из этих двух вариантов движения в большей мере способствует использованию полученных во время лекции знаний?

Первый вариант полезен в определенной мере, так как позволяет продолжить обсуждение затронутых в лекции вопросов. Несомненно вместе с тем, что лишь второй вариант движения, когда имеет место “динамическая неустойчивость” и имеет место “перемешивание” траекторий слушателей по территории России, позволяет донести полученные знания до школьников.

Этот пример демонстрирует, что динамическая неустойчивость движения и перемешивание могут и не вести к хаосу, а играть позитивную и конструктивную роль.

Вернемся после этого иллюстративного примера к физической системе. Рассмотрим разреженный газ. Это означает, что объем атома или молекулы газа гораздо меньше среднего объема, который приходится на одну частицу. Представим атомы в виде абсолютно упругих шариков. Такая модель во многих случаях оказывается вполне оправданной.

С точки зрения механики, для описания эволюции газа надо использовать систему уравнений для всех его атомов. Такая задача непосильна даже для самых мощных компьютеров. В чем же выход? Как же найти способ описания неравновесных процессов в газе — в системе, состоящей из огромного числа частиц? Покажем, что решение такой задачи возможно и именно благодаря конструктивной роли динамической неустойчивости движения атомов газа.

Благодаря динамической неустойчивости движения — экспоненциальному разбеганию траекторий, происходит перемешивание траекторий в фазовом пространстве. Это открывает возможность ввести понятие “сплошная среда” и использовать вместо микроскопических уравнений движения частиц газа приближенные уравнения для макроскопических функций. Атомарная структура системы принимается во внимание при определении понятия “точка сплошной среды.” Для этого необходимо

конкретное определение физически бесконечно малых масштабов времени и длины и соответствующего физически бесконечно малого объема, который и играет роль объема “точки” сплошной среды. Такое определение должно быть согласовано с определением минимальной области перемешивания и минимальным временем развития динамической неустойчивости.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Пригожин И.* От существующего к возникающему. М.: Наука, 1985.

2. *Хакен Г.* Синергетика. М: Мир, 1980.

3. *Климонтович Ю.Л.* Статистическая теория открытых систем. М.: Янус, 1995.

4. *Климонтович Ю.Л.* Физика открытых систем // Успехи физических наук. 1966. Т. 168.

5. Самоорганизация в науке / Под ред. И.Г. Акчурина и В.И. Аршинова. М.: Арго, 1994.

* * *

Юрий Львович Климонтович, доктор физико-математических наук, профессор, зав. лабораторией синергетики (самоорганизации) Физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. Область научных интересов: статистическая теория открытых систем. Лауреат Государственной премии России и премии Александра Гумбольдта 1994 года. Автор более 150 научных работ, 7 монографий и 3 учебных пособий.